



09/2403431

REC'D	27 APR 1999
WIPO	PCT

EJU

SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT  
CONFÉDÉRATION SUISSE  
CONFEDERAZIONE SVIZZERA

CH 98/157

**PRIORITY  
DOCUMENT**

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

**Bescheinigung**

Die beiliegenden Akten stimmen mit den ursprünglichen technischen Unterlagen des auf der nächsten Seite bezeichneten Patentgesuches für die Schweiz und Liechtenstein überein. Die Schweiz und das Fürstentum Liechtenstein bilden ein einheitliches Schutzgebiet. Der Schutz kann deshalb nur für beide Länder gemeinsam beantragt werden.

**Attestation**

Les documents ci-joints sont conformes aux pièces techniques originales de la demande de brevet pour la Suisse et le Liechtenstein spécifiée à la page suivante. La Suisse et la Principauté de Liechtenstein constituent un territoire unitaire de protection. La protection ne peut donc être revendiquée que pour l'ensemble des deux Etats.

RECEIVED  
APR - 5 2000  
MAIL ROOM

**Attestazione**

Gli uniti documenti sono conformi agli atti tecnici originali della domanda di brevetto per la Svizzera e il Liechtenstein specificata nella pagina seguente. La Svizzera e il Principato di Liechtenstein formano un unico territorio di protezione. La protezione può dunque essere rivendicata solamente per l'insieme dei due Stati.

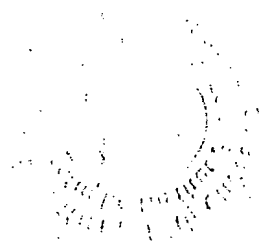
Bern, 20. April 1999

Eidgenössisches Institut für Geistiges Eigentum  
Institut Fédéral de la Propriété Intellectuelle  
Istituto Federale della Proprietà Intellettuale

Patentverfahren  
Administration des brevets  
Amministrazione dei brevetti

U. Kohler

de la Proprietate Intellectuală



**Patentgesuch Nr. 1998 0982/98**

HINTERLEGUNGSBESCHEINIGUNG (Art. 46 Abs. 5 PatV)

Das Eidgenössische Institut für Geistiges Eigentum bescheinigt den Eingang des unten näher bezeichneten schweizerischen Patentgesuches.

Titel:  
Optisch nichtlineares Halbleitermaterial und Verfahren zu dessen Herstellung.

Patentbewerber:  
Time-Bandwidth Products AG  
Technoparkstrasse 1  
8005 Zürich

Vertreter:  
Frei Patentanwaltsbüro  
Postfach 768  
8029 Zürich

Anmeldedatum: 30.04.1998

Voraussichtliche Klassen: H01L

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**

## OPTISCH NICHTLINEARES HALBLEITERMATERIAL UND VERFAHREN ZU DESSEN HERSTELLUNG

Die Erfindung betrifft ein optisch nichtlineares Halbleitermaterial, ein Verfahren zu dessen Herstellung und seine Verwendung.

- 5     Optisch nichtlineare Materialien werden in vielen Anwendungen eingesetzt. In der optischen Informationsverarbeitung werden sie z. B. gebraucht, um Licht mittels Lichtes zu schalten. In der optischen Kommunikation können sie dazu dienen, Signale von störendem Rauschen, welches bspw. durch verstärkte spontane Emission (amplified spontaneous emission, ASE) entsteht, zu säubern.
- 10    Ein weiteres Anwendungsgebiet ist die Laserphysik, wo solche Materialien als sättigbare Absorber für die passive Modenkopplung in Laserresonatoren zwecks Erzeugung von ultrakurzen Laserpulsen (im Femto- oder Picosekundenbereich) gebraucht werden. Die passive Modenkopplung kann bspw. durch die Verwendung eines Spiegels mit sättigbaren Absorbern aus Halbleitermaterialien (semiconductor saturable absorber mirror, SESAM) als Reso-
- 15    natorspiegel erreicht werden (vgl. U. Keller et al., "Semiconductor Saturable Absorber Mirrors (SESAM's) for Femtosecond to Nanosecond Pulse Generation in Solid-State Lasers", IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Band 2, Nr. 3, September 1996). Die Reflektivität eines solchen

SESAM-Spiegels ist höher bei hohen Lichtintensitäten wegen Ausbleichens der Absorption. Ein SESAM-Spiegel besteht typischerweise aus einem reflektierenden Substrat, einer sättigbaren Halbleiter-Absorberstruktur und, fakultativ, einer zusätzlichen Reflexions- bzw. Antireflexionsschicht.

5

In Anwendungen wie den obigen spielen (nebst anderen) die Materialeigenschaften

- a) Antwortzeit,
  - 10 b) Absorptionsmodulation und
  - c) nichtsättigbare Absorptionsverluste
- eine wesentliche Rolle und können deshalb als Schlüsselparameter bezeichnet werden. Folgende Anforderungen werden an diese Schlüsselparameter optisch nichtlinearer Materialien gestellt:

- 15 a) die Antwortzeit soll der jeweiligen Anwendung anpassbar sein (bspw. im Pico- oder Femtosekundenbereich liegen);
- b) die Absorptionsmodulation soll hoch sein;
- c) die nichtsättigbaren Absorptionsverluste sollen niedrig sein.

Bisher ist kein Material bekannt, welches all diese Anforderungen gleichzeitig  
20 in idealer Weise erfüllt. Vielmehr geht es in der Praxis darum, ein Material zu finden, welches die Anforderungen möglichst gut erfüllt. Oft bringt eine Massnahme zur Verbesserung eines Schlüsselparameters eine Verschlechterung eines anderen Schlüsselparameters mit sich. Gegebenenfalls muss also  
25 für eine bestimmte Anwendung ein nicht völlig befriedigenden, aber akzeptabler Kompromiss zwischen teilweise entgegengesetzten Materialeigenschaften geschlossen werden.

Unter dem Begriff "Antwortzeit" wird in dieser Schrift diejenige Zeit verstan-  
30 den, während welcher die anfänglich schnelle Änderung der optischen Materialeigenschaften hauptsächlich durch Ladungsträgereinfang (trapping) bestimmt

wird. Daneben werden die optischen Materialeigenschaften noch durch weitere, zumeist langsamere Mechanismen beeinflusst.

- 5 Als Beispiel für ein bekanntes optisch nichtlineares Material sei hier Galliumarsenid (GaAs) genannt. Das bevorzugte Verfahren zur Herstellung von GaAs ist die Molekularstrahlepitaxie (molecular beam epitaxy, MBE). Normalerweise wird GaAs bei Temperaturen zwischen 500 und 800 °C aufgewachsen. Dieses Normalwachstum liefert beinahe ideale stöchiometrische Kristalle mit  
10 hohen Absorptionsmodulationen, niedrigen nichtsättigbaren Absorptionsverlusten, aber langen Antwortzeiten (im Bereich von 100 ps).

- Um den Nachteil langer Antwortzeiten zu beseitigen, kann das GaAs auch bei  
15 tieferen Temperaturen von ca. 180 bis 500 °C aufgewachsen werden. Bei diesem Tieftemperaturverfahren entstehen nicht-stöchiometrische Kristalle mit einer hohen Kristalldefektdichte. Die Kristalldefektdichte und damit auch das Tieftemperaturverfahren kann mit Hilfe der Nahinfrarotabsorption (NIRA) oder der magnetisch zirkularen Absorptionsdoppelbrechung (magnetic circular  
20 dichroism of absorption, MCDA) bestimmt bzw. festgestellt werden (vgl. z. B. X. Liu et al., "Mechanism responsible for the semi-insulating properties of low-temperature-grown GaAs", Appl. Phys. Lett. 65 (23), 5. Dezember 1994, S. 3002 ff). Tatsächlich erreicht man mit dem Tieftemperaturverfahren einstellbare, kurze Antwortzeiten (im Bereich von Subpicosekunden bis mehrere 10  
25 ps); diese Vorteile müssen jedoch durch niedrige Absorptionsmodulationen und hohe nichtsättigbare Absorptionsverluste erkauft werden.

- Es ist Aufgabe der Erfindung, ein optisch nichtlineares Halbleitermaterial zu  
30 schaffen, welches zugleich beeinflussbare Antwortzeiten, hohe Absorptionsmodulationen und niedrige nichtsättigbare Absorptionsverluste aufweist. Wei-

ter ist es Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren zur Herstellung eines solchen Materials anzugeben.

5 Die Aufgabe wird gelöst durch das erfindungsgemässe Material und das erfindungsgemässe Verfahren, wie sie in den unabhängigen Patentansprüchen definiert sind.

10 Überraschenderweise wurde festgestellt, dass sich die obengenannten Schlüsselparameter a)-c) eines optisch nichtlinearen, bei tiefen Temperaturen aufgewachsenen Halbleitermaterials wie z. B. GaAs durch die folgenden Massnahmen wesentlich, d. h. um bis zu einer Grössenordnung, verbessern lassen:

i) Versetzen mit Fremdatomen und/oder

15 ii) zusätzliches Ausheizen (annealing).

Halbleitermaterialien, bei deren Herstellung mindestens eine dieser Massnahmen getroffen wurde, vereinigen erstaunlich günstige nichtlinear-optische Materialeigenschaften und kommen so auf bisher unerreichte Weise einer Optimierung der Schlüsselparameter nahe. Insbesondere weisen sie

20 a) beeinflussbare Antwortzeiten, sowie zugleich

b) hohe Absorptionsmodulationen (vergleichbar mit jenen von normal aufgewachsenen Halbleitermaterialien) und

c) niedrige nichtsättigbare Absorptionsverluste (vergleichbar mit jenen von normal aufgewachsenen Halbleitermaterialien)

25 auf. Daher eignen sie sich ausgezeichnet für nichtlinear-optische Anwendungen, insbesondere in der optischen Informationsverarbeitung zum ultraschnellen Schalten von Licht mittels Lichtes, in der optischen Kommunikation zur Säuberung von optischen Signalen von störendem Rauschen oder in der Ultrakurzpuls-Laserphysik als sättigbarer Absorber für ultrakurze Pulse aussen-

30 dende Laser. Im letzteren Anwendungsgebiet eignet sich das erfindungsge-



mässe Halbleitermaterial speziell für Spiegel mit mindestens einem sättigbaren Absorber aus diesem Halbleitermaterial.

- 5 Als Halbleitermaterial wird vorzugsweise ein III-V-Halbleiter, bspw. Galliumarsenid (GaAs), Indium-Galliumarsenid (InGaAs), Aluminium-Galliumarsenid (AlGaAs) oder Indium-Galliumarsenid-Phosphid (InGaAsP), gewählt. Das Halbleitermaterial wird vorzugsweise mittels Molekularstrahlepitaxie (MBE) hergestellt. Ein anderes mögliches Herstellungsverfahren ist die Gasphasenabscheidung, insbesondere die metallorganische Gasphasenabscheidung (metalorganic chemical vapor deposition, MOCVD).
- 10

Bei einer ersten erfindungsgemässen Verfahrensvariante wird ein Halbleitermaterial bei Temperaturen zwischen 180 und 500 °C hergestellt und mit Fremdatomen versetzt. Bei den Fremdatomen handelt es sich vorzugsweise um mindestens ein Akzeptormaterial, z. B. Beryllium (Be). Die Dotierung erfolgt vorzugsweise während des epitaktischen Wachstums des Halbleitermaterials in einer Ultrahochvakuumkammer im Molekularstrahl. Die Fremdatomkonzentration wird über das Verhältnis des Molekularstrahlflusses, bspw. von Be zu Ga und As, eingestellt. Eine solche Dotierung lässt sich nachträglich z. B. mit Hilfe der Sekundärionenmassenspektroskopie (SIMS) feststellen. Typische Be-Konzentrationen liegen zwischen  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  und  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ .

15

20

25 Bei einer zweiten erfindungsgemässen Verfahrensvariante wird das Halbleitermaterial bei Temperaturen zwischen 180 und 500 °C hergestellt und anschliessend ausgeheizt. Das Ausheizen kann während mindestens 10 Minuten bei Temperaturen zwischen 500 und 800 °C, oder auch als Kurzeitenausheizen (rapid thermal annealing, RTA) während bspw. 10 s bei ca. 600 bis 1000 °C erfolgen. Das Ausheizen führt meist zu einer gewissen Ausfällung (precipitate)

30

einer Halbleiterkomponente; bei GaAs bilden sich bspw. As-Kügelchen mit Durchmessern im Nanometerbereich, typischerweise zwischen 2 und 10 nm, mit einer Dichte von  $10^{17}$  bis  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . (vgl. z. B. M.R. Melloch et al., "Formation of arsenic precipitates in GaAs buffer layers grown by molecular beam epitaxy at low substrate temperatures, Appl. Phys. Lett. 57 (15), 8. Oktober 1990, S. 1531 ff); auch eine grössere Bandbreite der Dichte, bspw. von  $10^{15}$  bis  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , ist möglich. Handelt es sich um ein As-haltiges III-V-Halbleitermaterial, so geschieht das Ausheizen vorzugsweise in einer As-Atmosphäre, um ein Verdrängen von As aus dem Halbleiter zu verhindern oder zumindest zu reduzieren.

Die Versetzung mit Fremdatomen und/oder das Ausheizen führt zu einer erheblichen Verbesserung der Schlüsselparmeter des Halbleitermaterials. Diese erfindungsgemässen Massnahmen bei der Herstellung bewirken, dass die Antwortzeiten wesentlich kürzer sind als bei Halbleitermaterialien, welche bei tiefen Temperaturen ohne Dotierung und ohne Ausheizen hergestellt wurden; trotzdem bleiben die Absorptionsmodulation hoch und die nichtsättigbaren Absorptionsverluste niedrig.

20

Die günstigen Auswirkungen der Be-Dotierung und/oder des Ausheizens können durch folgendes Modell erklärt werden (vgl. das Modell für undotiertes, bei niedrigen Temperaturen gewachsenes GaAs in, z. B., U. Siegner et al., "Ultrafast high-intensity nonlinear absorption dynamics in low-temperature grown gallium arsenide", Appl. Phys. Lett. 69 (17), 21. Oktober 1996, S. 2566 ff). Die nichtsättigbaren Absorptionsverluste werden auf einen Übergang zwischen neutralen Antisites (bspw.  $\text{As}_{\text{Ga}}^0$ ) im Halbleitermaterial (bspw. GaAs) und den Bandzuständen, welche sich 0.7 eV über dem unteren Ende des Leitungsbandes befinden, zurückgeführt. Wegen der hohen Neutrale-Antisite-Konzentration und der hohen Dichte der Endzustände kann dieser Über-

30

gang nur bei sehr hohen Lichtflussdichten gesättigt werden. Die erfindungsgemässe Be-Dotierung bzw. das erfindungsgemässe Ausheizen verringern nun beträchtlich die Konzentration der neutralen Antisites durch Änderung des Ladungszustandes der Defekte bzw. durch Ausfällung. Infolgedessen kann der Übergang zwischen den neutralen Antisites und dem Leitungsband zumindest teilweise gesättigt werden, wodurch die nichtsättigbaren Absorptionsverluste verringert und die Absorptionsmodulation erhöht wird.

Im folgenden wird die Erfindung anhand von Figuren detailliert erläutert. Die aufgeführten Beispiele beziehen sich auf GaAs; die Erfindung betrifft aber nicht nur dieses Halbleitermaterial, sondern auch andere Halbleitermaterialien. Es zeigen:

Fig. 1 die gemessene normierte differentielle Reflektivität gegenüber der Zeitverzögerung eines Testpulses zu einem kurzen Pumpuls für GaAs mit verschiedenen Be-Konzentrationen,

Fig. 2 die gemessene normierte differentielle Reflektivität gegenüber der Zeitverzögerung eines Testpulses zu einem kurzen Pumpuls für ausgeheiztes und nicht ausgeheiztes GaAs,

Fig. 3 die gemessene normierte differentielle Reflektivität gegenüber der Zeitverzögerung eines Testpulses zu einem langen Pumpuls für mit verschiedenen Verfahren hergestelltes GaAs,

Fig. 4 gemessene Absorptionsmodulationen gegenüber der Wachstumstemperatur für GaAs mit verschiedenen Be-Konzentrationen,

Fig. 5 gemessene Absorptionsmodulationen gegenüber der Wachstumstemperatur für ausgeheiztes und nicht ausgeheiztes GaAs,

- Fig. 6 gemessene nichtsättigbare Absorptionsverluste gegenüber der Wachstumstemperatur für GaAs mit verschiedenen Be-Konzentrationen,
- 5 Fig. 7 gemessene nichtsättigbare Absorptionsverluste gegenüber der Wachstumstemperatur für ausgeheiztes und nicht ausgeheiztes GaAs,
- 10 Fig. 8 die gemessene Reflektivität gegenüber der Lichtflussdichte für GaAs mit verschiedenen Be-Konzentrationen und
- Fig. 9 einen schematischen Querschnitt durch eine bevorzugte Ausführungsform eines Spiegels mit sättigbaren Absorbern aus erfindungsgemässen Halbleitermaterialien.

15

Figur 1 zeigt die gemessene normierte differentielle Reflektivität gegenüber der Zeitverzögerung eines Testpulses zu einem kurzen Pumpuls mit einer Pulslänge von 15 fs und einer Zentralwellenlänge von 750 nm. Die Messkurven beziehen sich auf bei 300 °C gewachsenes GaAs mit verschiedenen Be-

20 Konzentrationen, nämlich:

Kurve 1.1: undotiertes GaAs,

Kurve 2.1: GaAs mit einer Be-Konzentration von  $1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  und

Kurve 3.1: GaAs mit einer Be-Konzentration von  $3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .

25 Bei den Kurven 1.2, 2.2 bzw. 3.2 handelt es sich um Ausgleichskurven (fits) zu den entsprechenden Messwerten 1.1, 2.1 bzw. 3.1, wobei für die Ausgleichsrechnung die Funktion

$$a + b \cdot \exp(-t/\tau)$$

verwendet wurde. Die so berechneten Zeitkonstanten  $\tau$  verringern sich von

30 480 fs über 390 fs bis 110 fs für die zunehmenden Be-Konzentrationen. Diese

Messung demonstriert also eindrücklich die Beeinflussbarkeit der Antwortzeit durch die Be-Konzentration.

- 5 In **Figur 2** ist dieselbe Messung für denselben Testpuls wie in **Fig. 1** aufgetragen, jedoch für undotiertes, bei 300 °C gewachsenes GaAs. Kurve 4.1 zeigt Messwerte für nicht ausgeheiztes GaAs, Kurve 5.1 Messwerte für GaAs, welches nach dem Aufwachsen während einer Stunde bei 600 °C ausgeheizt wurde. Kurven 4.2 bzw. 5.2 sind die entsprechenden Fits. Die **Figur 2** beweist,  
10 dass die Antwortzeit auch beim erfindungsgemässe Verfahren mit Ausheizen beeinflussbar ist.

**Figur 3** zeigt die gemessene normierte differentielle Reflektivität gegenüber  
15 der Zeitverzögerung eines Testpulses zu einem langen Pumpimpuls mit einer Pulslänge von 100 fs und einer Zentralwellenlänge von 830 nm. Die Messkurven beziehen sich auf bei 300 °C gewachsenes GaAs, welches wie folgt hergestellt wurde:

- Kurve 6: undotiertes, nicht ausgeheiztes GaAs,  
20 Kurve 7: nicht ausgeheiztes GaAs mit einer Be-Konzentration von  $3 \cdot 10^{19}$  cm<sup>-3</sup> und

Kurve 8: undotiertes, während einer Stunde bei 600 °C ausgeheiztes GaAs.  
Gemäss diesen Messungen lassen sich die Antwortzeiten mit dem erfindungsgemässen Verfahren, welches die Dotierung und/oder das Ausheizen beinhaltet,  
25 beeinflussen.

**Figur 4** zeigt gemessene Absorptionsmodulationen gegenüber der Wachstumstemperatur für GaAs mit verschiedenen Be-Konzentrationen. Dabei bedeuten:  
30 offene Quadrate: undotiertes GaAs,  
volle Kreise: GaAs mit einer Be-Konzentration von  $1 \cdot 10^{19}$  cm<sup>-3</sup> und

volles Dreieck: GaAs mit einer Be-Konzentration von  $3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .

Die Messungen für undotiertes GaAs (offene Quadrate) bestätigen die bekannte Tatsache, dass bei hohen Temperaturen ( $\geq \text{ca. } 300^\circ\text{C}$ ) aufgewachsenes GaAs befriedigend hohe Absorptionsmodulationen (um ca. 60 %) aufweist, bei tiefen Temperaturen ( $< \text{ca. } 300^\circ\text{C}$ ) aufgewachsenes GaAs hingegen nicht. Die erstaunliche Aussage von Fig. 4 ist, dass die Be-Dotierung die Absorptionsmodulation nicht erniedrigt (vgl.  $300^\circ\text{C}$ ), sondern sogar eher erhöht (vgl.  $250^\circ\text{C}$ ). Dabei ist zu beachten, dass die Antwortzeiten in Be-dotiertem Material viel kürzer sind. Undotiertes, bei tiefen Temperaturen aufgewachsenes GaAs mit vergleichbaren Antwortzeiten müsste bei ca.  $200^\circ\text{C}$  aufgewachsen werden, wodurch die Absorptionsmodulation beträchtlich sinkt und die nicht-sättigbaren Absorptionsverluste beträchtlich grösser werden.

Die Messungen von **Figur 5** sind analog zu denjenigen von Fig. 4, jedoch für undotiertes GaAs, wobei

offene Quadrate: nicht ausgeheiztes GaAs und  
volle Rauten: während einer Stunde bei  $600^\circ\text{C}$  ausgeheiztes GaAs  
bedeuten. Auch hier gilt, dass das erfindungsgemässe Ausheizen die Absorptionsmodulation nicht erniedrigt (vgl.  $300\text{-}600^\circ\text{C}$ ), sondern eher erhöht (vgl.  $200\text{-}250^\circ\text{C}$ ).

**Figur 6** zeigt gemessene nichtsättigbare Absorptionsverluste gegenüber der Wachstumstemperatur für GaAs mit verschiedenen Be-Konzentrationen, wobei dieselben Be-Konzentrationen und Symbole verwendet werden wie in Fig. 4. Die Messungen für undotiertes GaAs (offene Quadrate) bestätigen die bekannte Tatsache, dass bei hohen Temperaturen ( $\geq \text{ca. } 300^\circ\text{C}$ ) aufgewachsenes GaAs befriedigend niedrige nichtsättigbare Absorptionsverluste (um ca. 10 %) aufweist, bei tiefen Temperaturen ( $< \text{ca. } 300^\circ\text{C}$ ) aufgewachsenes GaAs hingegen nicht. Die erstaunliche Aussage von Fig. 6 ist, dass die Be-Dotierung

die nichtsättigbaren Absorptionsverluste nicht erhöht, sondern sogar eher erniedrigt.

- 5 Die Messungen von **Figur 7** sind analog zu denjenigen von Fig. 6, jedoch für undotiertes GaAs, wobei dieselben Ausheizbedingungen und Symbole verwendet werden wie in Fig. 5. Auch hier gilt, dass das erfindungsgemässe Ausheizen die nichtsättigbaren Absorptionsverluste nicht erhöht, sondern eher erniedrigt.

10

**Figur 8** zeigt die gemessene Reflektivität gegenüber der Lichtflussdichte für GaAs mit verschiedenen Be-Konzentrationen, nämlich:

- Kurve 9: undotiertes GaAs,  
15 Kurve 10: GaAs mit einer Be-Konzentration von  $1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  und  
Kurve 11: GaAs mit einer Be-Konzentration von  $3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .

Anhand der Kurve 11 werden verschiedene Bereiche der Lichtflussdichte diskutiert. Für niedrige Lichtflussdichten ( $< \text{ca. } 1 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ ) verhält sich das GaAs optisch linear, d. h. die Reflektivität hat einen konstanten Wert  $R_0 \approx 40$   
20 %. Ab  $\text{ca. } 1 \mu\text{J}/\text{cm}^2$  beginnen nichtlinear-optische Effekte eine Rolle zu spielen; die Reflektivität kann maximal um eine Absorptionsmodulation  $\Delta R \approx 45$  % variiert werden, abhängig von der Lichtflussdichte. Bei hohen Lichtflussdichten ( $> \text{ca. } 1000 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ ) tritt eine Sättigung von  $\text{ca. } R_s \approx 85$  % ein. Die nichtsättigbaren Absorptionsverluste berechnen sich gemäss

25 
$$R_{\text{ns}} = 100 \% - R_s \approx 15 \% .$$

In **Figur 9** ist schematisch eine bevorzugte Ausführungsform eines Spiegels  
30 mit sättigbaren Absorbern aus erfindungsgemässen Halbleitermaterialien im Querschnitt dargestellt. Dabei stehen aus Gründen der übersichtlichen Darstellung die Dicken einzelner Elemente nicht unbedingt im richtigen Verhält-

nis zueinander. Der Spiegel 20 besteht aus einem reflektierenden Substrat 21 und einer sättigbaren Halbleiter-Absorberstruktur 22. Fakultativ könnte auf der sättigbaren Halbleiter-Absorberstruktur 22 eine (nicht eingezeichnete) zusätzliche Reflexions- bzw. Antireflexionsschicht aufgebracht sein.

5

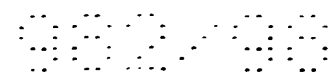
Das reflektierende Substrat 21 ist vorzugsweise ein mit einem Bragg-Struktur 23 versehenes Trägersubstrat 24, bspw. aus GaAs. Die Bragg-Struktur 23 ist vorzugsweise als Stapel von Lambda-Viertel-Schichten 25.1, ..., 25.p bzw. 26.1, 10 ..., 26.q aus Halbleitermaterialien und/oder Dielektrika ausgebildet, wobei sich Schichten 25.1, ..., 25.p tiefer Brechzahl mit Schichten 26.1, ..., 26.q hoher Brechzahl abwechseln; typischerweise ist  $p \approx q \approx 25$ . Die Lambda-Viertel-Schichten bestehen bspw. aus AlAs 25.1, ..., 25.p ( $n = 2.99$  bei  $\lambda = 835$  nm) bzw. aus undotiertem, nicht ausgeheiztem GaAs 26.1, ..., 26.q ( $n = 3.65$  bei  $\lambda$  15 = 835 nm). Die sättigbare Halbleiter-Absorberstruktur 22 der beispielhaften Ausführungsform von Fig. 9 besteht aus:

- einer ersten AlAs-Schicht 27.1 mit einer Dicke von 75 nm,
- einer ersten nichtlinear-optischen, nach dem erfindungsgemässen Ver-  
fahren hergestellten GaAs-Schicht 28.1 mit einer Dicke von 15 nm,
- 20 - einer zweiten AlAs-Schicht 27.2 mit einer Dicke von 15 nm und
- einer zweiten nichtlinear-optischen, nach dem erfindungsgemässen Ver-  
fahren hergestellten GaAs-Schicht 28.2 mit einer Dicke von 5 nm.

Ein solcher Spiegel 20 weist hohe Reflektivitäten von ca.  $R \geq 0.99$  (leicht abhängig von der einfallenden Lichtleistung) auf. Schematisch, als Pfeil 29, ist 25 ein am Spiegel 20 reflektierter Lichtstrahl angedeutet.

Selbstverständlich ist es dem Fachmann möglich, bei Kenntnis der vorliegen-  
den Erfindung weitere erfindungsgemässe Spiegel mit sättigbaren Absorbern  
30 zu konstruieren.





## PATENTANSPRÜCHE

1. Verfahren zur Herstellung eines optisch nichtlinearen Halbleitermaterials, bei welchem ein Halbleitermaterial bei Temperaturen zwischen 180 und 500 °C hergestellt und mit Fremdatomen versetzt wird.  
5
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Halbleitermaterial mit mindestens einem Akzeptormaterial, vorzugsweise mit Beryllium (Be), versetzt wird.  
10
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Halbleitermaterial mittels Molekularstrahlepitaxie (MBE) hergestellt wird.  
15
4. Verfahren zur Herstellung eines optisch nichtlinearen Halbleitermaterials, bei welchem ein Halbleitermaterial bei Temperaturen zwischen 180 und 500 °C hergestellt und anschliessend ausgeheizt wird.  
20
5. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Ausheizen während mindestens 10 Minuten bei Temperaturen zwischen 500 und 800 °C erfolgt.  
25

6. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Ausheizen während höchstens einer Minute bei Temperaturen zwischen 600 und 1000 °C erfolgt.

5

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1-6, **dadurch gekennzeichnet**, dass als Halbleitermaterial ein III-V-Halbleiter gewählt wird.

8. Verfahren nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass der III-V-Halbleiter Galliumarsenid (GaAs), Indium-Galliumarsenid (InGaAs), Aluminium-Galliumarsenid (AlGaAs) oder Indium-Galliumarsenid-Phosphid (InGaAsP) ist.

15

9. Halbleitermaterial, hergestellt mit dem Verfahren nach einem der Ansprüche 1-8, **dadurch gekennzeichnet**, dass es sich um bei Temperaturen zwischen 180 und 500 °C hergestelltes Be-dotiertes GaAs handelt.

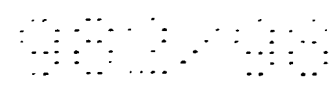
20

10. Halbleitermaterial nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass es eine Be-Konzentration zwischen  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  und  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  aufweist.

25

11. Halbleitermaterial, hergestellt mit dem Verfahren nach einem der Ansprüche 1-8, **dadurch gekennzeichnet**, dass es sich um bei Temperaturen zwischen 180 und 500 °C hergestelltes und nachträglich ausgeheiztes GaAs handelt.

30



12. Halbleitermaterial nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass es As-Kügelchen mit Durchmessern zwischen 2 und 10 nm mit einer Dichte von  $10^{15}$  bis  $10^{19}$  cm<sup>-3</sup> enthält.
- 5
13. Verwendung des mit dem Verfahren nach einem der Ansprüche 1-8 hergestellten Halbleitermaterials als nichtlinear-optisches Material.
14. Verwendung nach Anspruch 13 zum ultraschnellen Schalten von 10 Licht mittels Lichtes, zur Säuberung von optischen Signalen von störendem Rauschen oder als sättigbarer Absorber für ultrakurze Pulse aussendende Laser.
- 15
15. Halbleitermaterial, hergestellt mit dem Verfahren nach einem der Ansprüche 1-8, für die Verwendung zur Herstellung von Produkten für die optische Informationsverarbeitung, die optische Telekommunikation oder die Ultrakurzpuls-Laserphysik.
- 20
16. Spiegel (20) mit mindestens einem sättigbaren Absorber (28.1, 28.2) aus mindestens einem Halbleitermaterial, welches mit dem Verfahren nach einem der Ansprüche 1-8 hergestellt ist.
- 25

## ZUSAMMENFASSUNG

Wesentliche nichtlinear-optische Materialeigenschaften eines bei tiefen Temperaturen aufgewachsenen Halbleitermaterials lassen sich durch die folgenden Massnahmen wesentlich verbessern: Versetzen mit Fremdatomen und/oder  
5 zusätzliches Ausheizen. Wird bspw. bei 300 °C aufgewachsenes GaAs mit Be auf eine Konzentration von  $3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  dotiert, so verringert sich die Antwortzeit von 480 fs (Kurve 1.1) auf 110 fs (Kurve 3.1), ohne dass sich dadurch die Absorptionsmodulation verringert oder die nichtsättigbaren Absorptionsverluste erhöhen. Halbleitermaterialien, bei deren Herstellung mindestens eine  
10 der obigen Massnahmen getroffen wurde, weisen beeinflussbare, insbesondere kurze Antwortzeiten sowie zugleich hohe Absorptionsmodulationen und niedrige nichtsättigbare Absorptionsverluste auf. Daher eignen sie sich ausgezeichnet für nichtlinear-optische Anwendungen wie optische Informationsverarbeitung, optische Kommunikation oder Ultrakurzpuls-Laserphysik.

15

(Figur 1)

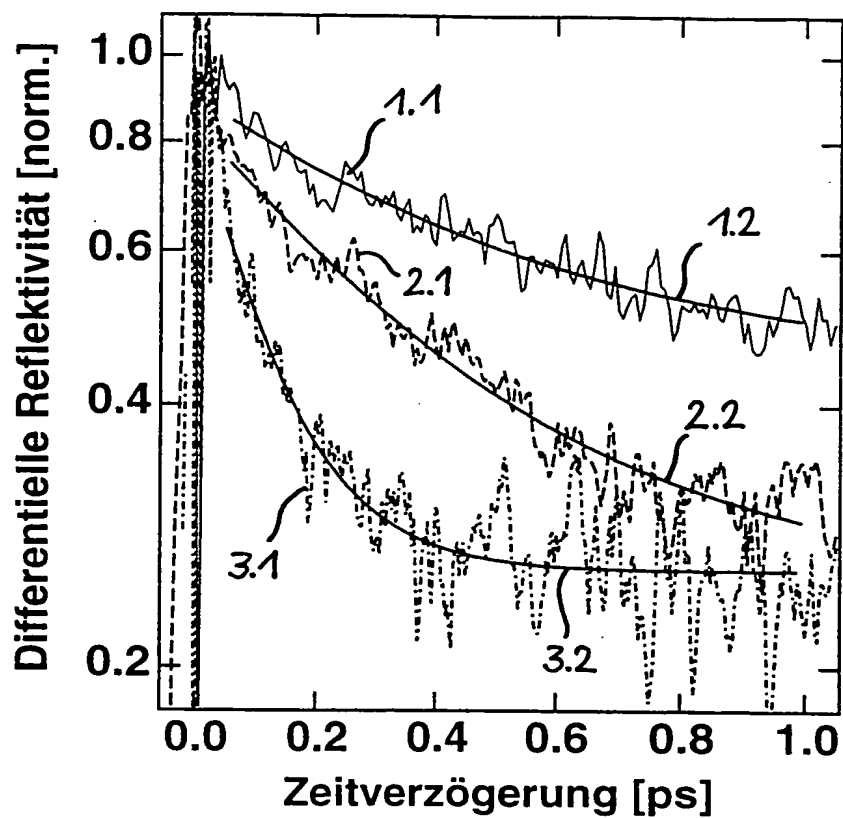


Fig. 1

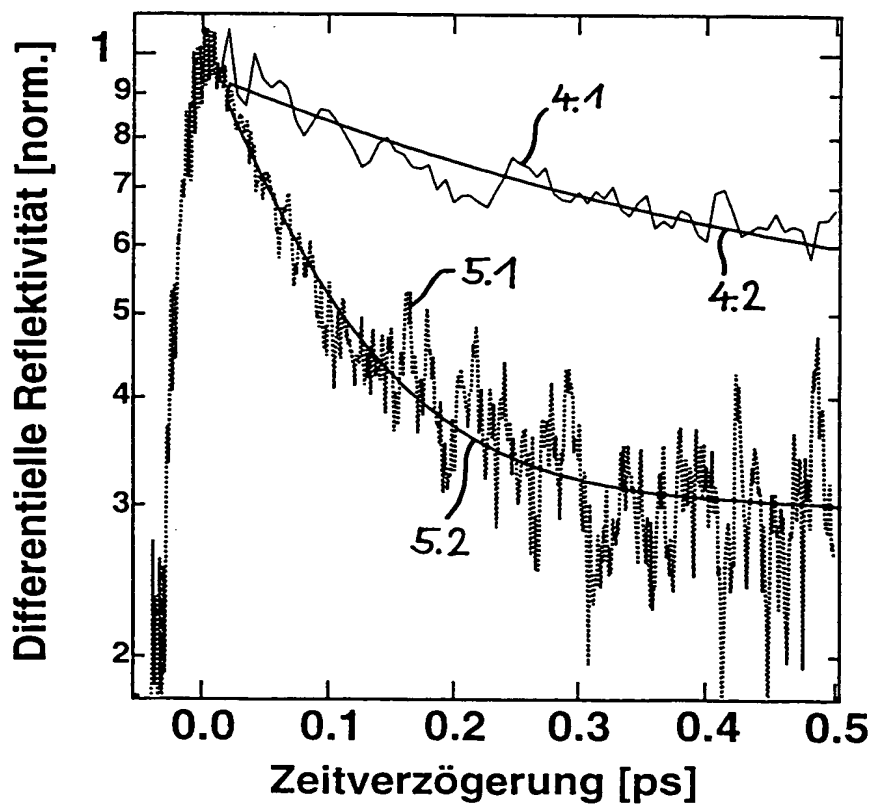


Fig. 2

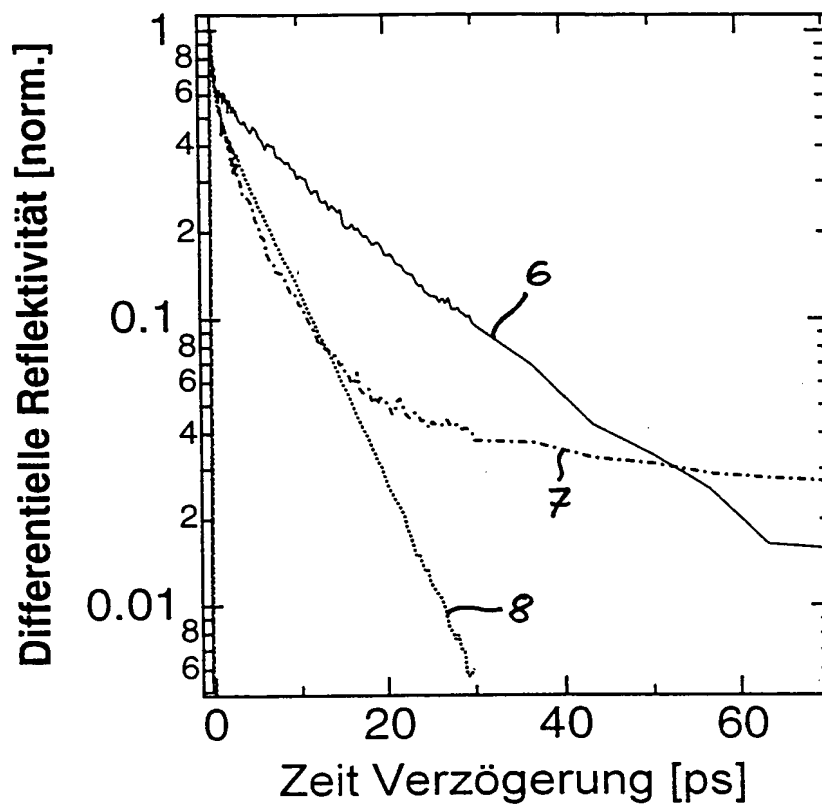


Fig. 3

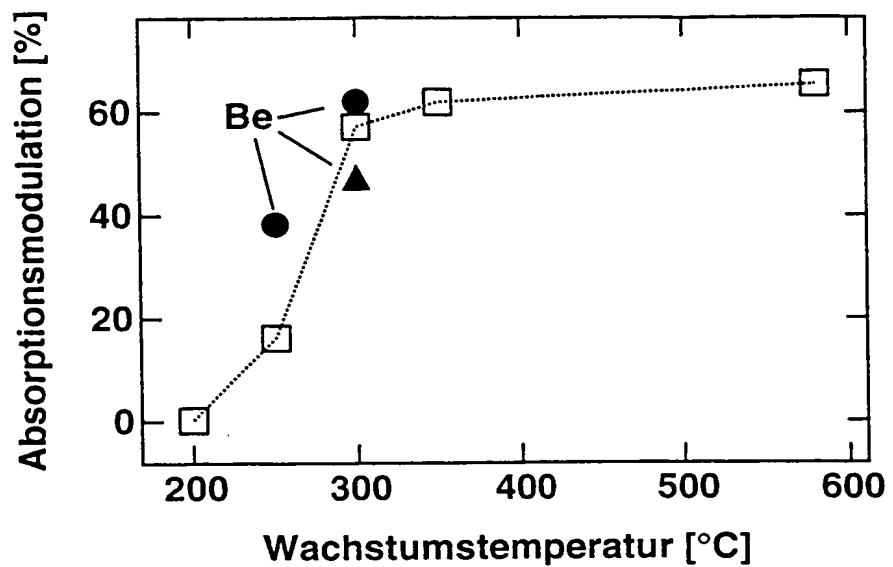


Fig. 4

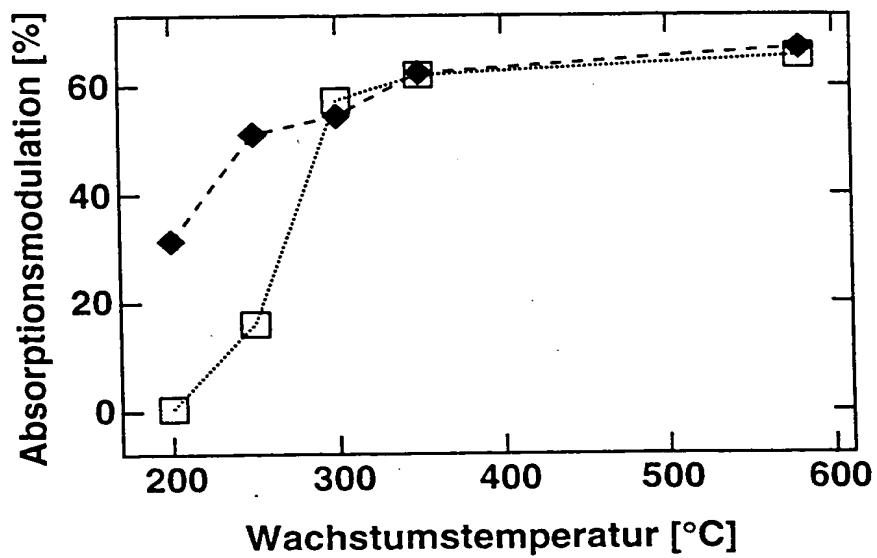


Fig. 5

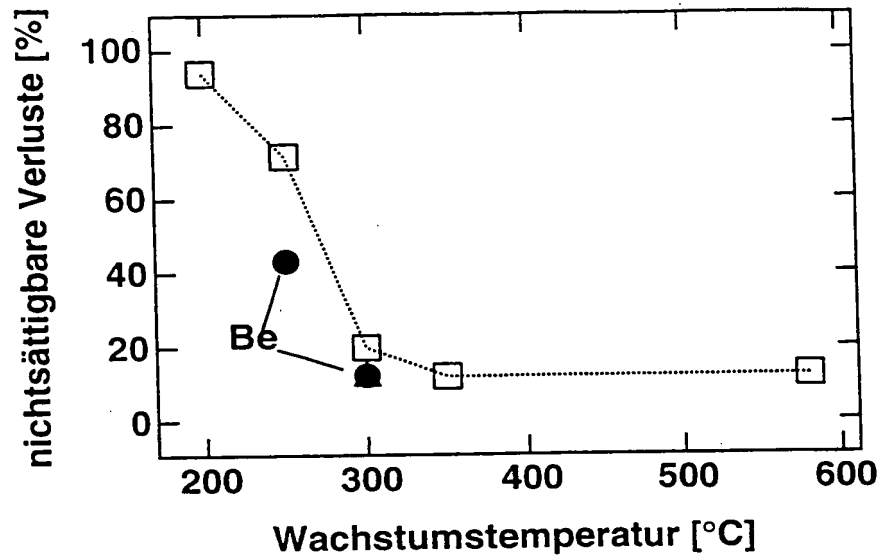


Fig. 6

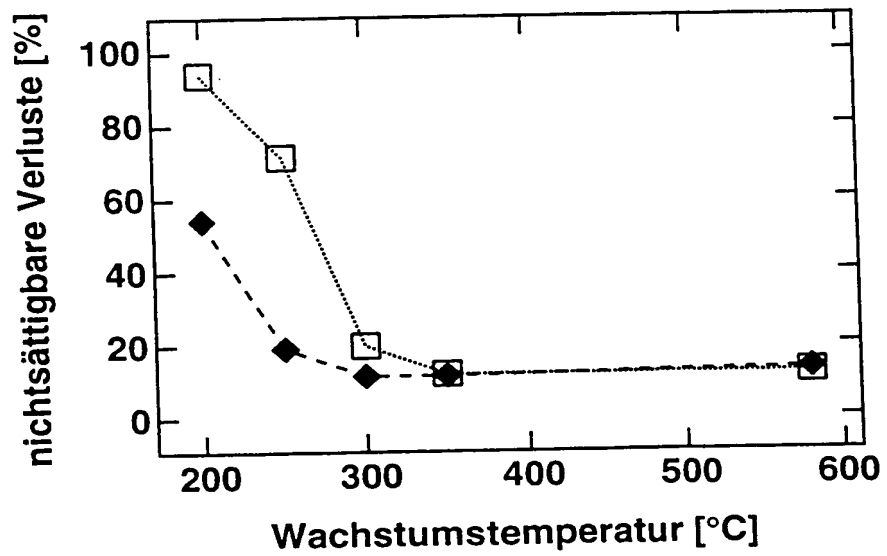


Fig. 7



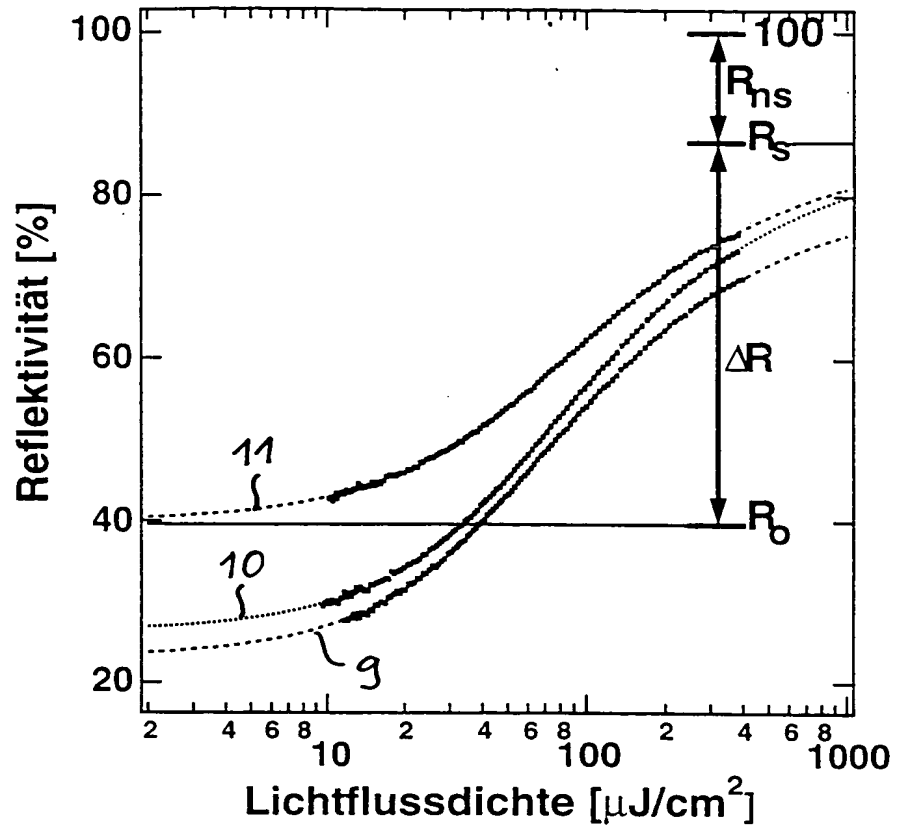


Fig. 8

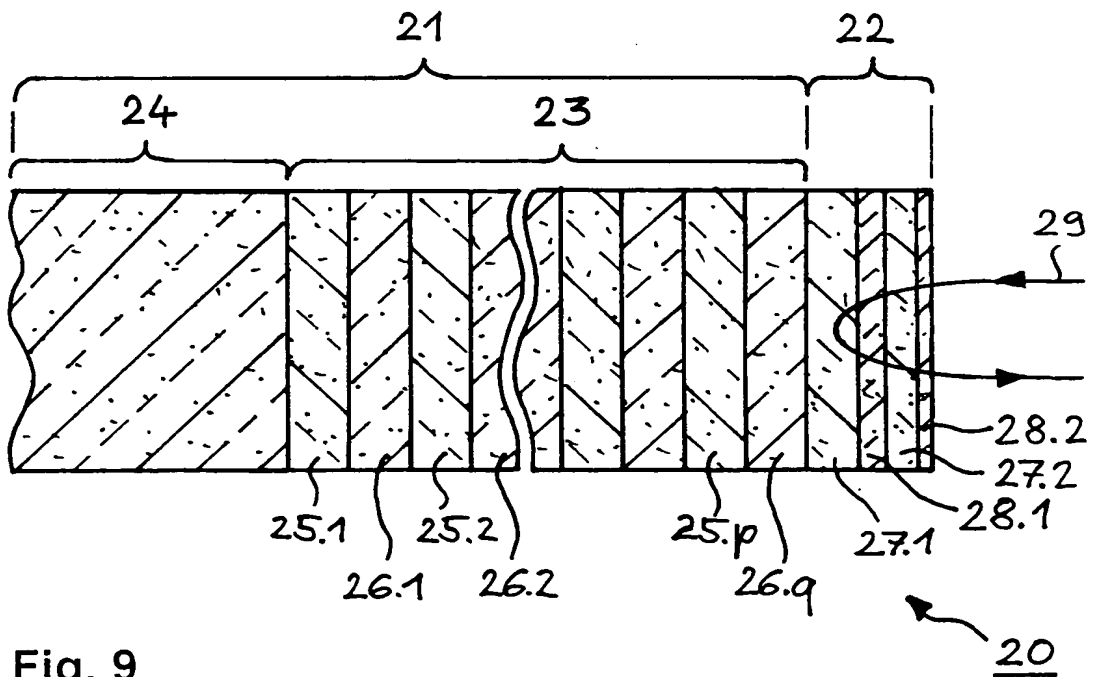


Fig. 9

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**